

Естественное освещение подземных пространств

А.К. СОЛОВЬЁВ

НИУ «МГСУ», Москва
E-mail: agpz@mgsu.ru

Аннотация

Подземные пространства в центрах городов обладают большой привлекательностью для инвесторов, но предъявляют особые требования к своей внутренней среде, которые выполняются с помощью систем естественного освещения. В статье даются примеры естественного освещения подземных пространств и отмечается, что обычные системы верхнего естественного освещения не всегда применимы, создавая большие теплопотери, тогда как полые трубчатые световоды позволяют избежать недостатков обычных систем естественного освещения. Приводится методика расчёта КЕО от полых трубчатых световодов и анализируются результаты расчёта КЕО под световодами разного диаметра на разной глубине под землёй.

Ключевые слова: города, подземные пространства, естественное освещение, КЕО, полые трубчатые световоды.

Введение

Подземные пространства приобретают всё большее значение в архитектуре городов, в центральных районах которых, как обычно, территории полностью застроены. Любые открытые площади становятся неоценимым градостроительным элементом, притягивающим внимание людей, позволяющим спокойно осматривать прилегающую застройку, пройтись пешком и погулять по центру. В то же время подземное пространство под такими площадями привлекательно для инвесторов, позволяя использовать его в качестве торговых и досуговых площадей, ресторанов, магазинов, предприятий обслуживания и т.п. Однако подземные городские пространства предъявляют к своей внутренней среде особые требования. Люди должны под землёй чувствовать себя комфортно и безопасно и по возможности не терять связи с внешней средой.

Примеры подземных пространств

- Наиболее известный в России пример указанных подземных пространств – трёхуровневый подземный торговый комплекс «Охотный ряд» на Манежной площади в Москве, имеющий входные узлы в виде атриумов, освещаемых большими светопрозрачными куполами. Один из таких куполов имеет диаметр около 20 м (рис. 1) и освещает естественным светом (ЕС) центральный зал (имеющий три уровня подземного пространства), тогда как рестораны и кафе, находящиеся под балконами атриума, освещаются постоянно действующими ОУ искусственного света. Меняющиеся уровни естественного света создают в них естественную динамику освещения. Искусственным светом освещаются и все подземные магазины, примыкающие к центральному атриуму, а также коридоры, соединяющие входные узлы, но динамика освещения, свойственная естественному свету, там отсутствует.

Коридоры, по крайней мере, на первом подземном уровне, могли бы тоже освещаться ЕС – с помощью ленточных зенитных фонарей. Освещаться ЕС могли бы и магазины – с помощью полых трубчатых световодов (ПТС) [1–3]. Последние могли бы подавать ЕС и для освещения магазинов второго и третьего подземных уров-

ней, для чего, конечно, бы следовало реорганизовать наземную планировку Манежной площади (рис. 2), освободив место для зенитного фонаря и светоприёмных устройств ПТС, что, в принципе, возможно с учётом основного рекреационного назначения наземного пространства Манежной площади. Проведение ЕС в подземное пространство повысило бы чувство комфортности и безопасности людей в подземном пространстве. При этом монотонность и постоянный спектр искусственного света будут нарушены динамикой уровней и спектра ЕС, а посетители почувствуют минимальную связь с внешней средой, время дня и состояние погоды.

- Ещё один пример использования ЕС для освещения подземного пространства – пересадочный узел Флинтгольм в Копенгагене, объединяющий станции метро, кольцевой железной дороги и железной дороги, ведущей в Фредериксунд. Шесть платформ расположены под стеклянной крышей размером 180×60 м². В результате все станции освещены ЕС. При этом две станции расположены на мостах, а станции на линиях, проходящих в поперечном направлении, – на нижнем мостовом уровне. Ещё ниже находится автовокзал [4].

На конструкции, расположенной выше стеклянной крыши, смонтированы все ОУ искусственного света. Поэтому их легко обслуживать, не мешая движению поездов. Для освещения тёпло-белым светом применены ГЛН с цветовой температурой 3000 К. Основное искусственное освещение производится светодиодной лентой длиной 2,5 км, освещающей в тёмное время суток и пасмурную погоду подземное пространство и стальные конструкции пересадочного узла.

Рис. 1. Купол центрального зала торгового комплекса «Охотный ряд»



Проект естественного и искусственного освещения этого крупного пересадочного узла и всех новых метро станций в Копенгагене создан известным проектным бюро *Bartenbach LichtLabor*. В новых станциях метро проектировщики попытались избежать сумеречных закоулков, превратив грязные и тёмные станции в светлые залы, частично освещаемые ЕС. Если раньше, подходя к тёмным входным трубам эскалаторов, пассажиры чувствовали напряжение, то теперь во входных зонах присутствует приятная атмосфера естественного света (рис. 3). При этом люди ощущают перемены погоды, чувствуют «прохладный» (холодно-белый) ЕС утром и более тёплый (нейтрально-белый) – вечером. Всё это обеспечило связь с внешней средой, повысило ощущение безопасности под землёй.

ЕС на станции обычно подаётся через зенитные фонари. Боковые стенки их шахт облицованы чистым алюминием и позволяют доставлять ЕС на глубину станций метро без больших потерь, подобно ПТС.

При этом движение солнца передаётся в помещение с помощью стеклянных призм, установленных в зенитных фонарях. Призмы разлагают солнечный свет на спектральные составляющие. Это создаёт на стенах картины, подобные радуге, которые перемещаются по поверхностям входных узлов и эскалаторов (рис. 4).

Однако при большом сечении шахт, характерном для зенитных фонарей, создать зеркальное отражение поверхностей шахт (подобно тому, как это имеет место в ПТС) – задача технически (запыление) и финансово очень сложная. Поэтому сравнивать эффективность этих устройств нельзя.

Освещение подземных пространств посредством полых трубчатых световодов

Рассмотренные примеры показывают, что при неглубоком заложении подземных пространств города их возможно и целесообразно освещать с помощью разных систем подачи ЕС. Обычные, в виде зенитных фонарей и светопрозрачных покрытий, дают много света, но не свободны от недостатков. Во-первых, устройство зенитных фонарей и светопрозрачных покрытий требует использования больших площадей городских территорий,

Рис. 2. Наземная планировка Манежной площади



Рис. 3. Входная зона в метро, Копенгаген. (Фото П. Бартенбаха)



которые уже не могут использоваться как рекреационные зоны. А во-вторых, зенитные фонари и другие светопрозрачные конструкции создают в подземных пространствах города большие теплотери зимой и теплопоступления летом, которые надо компенсировать путём значительных расходов энергии.

Использование ПТС сглаживает эти недостатки [1–3]. Площади, занимаемые приёмными элементами ПТС, значительно меньше. Теплотери и теплопоступления через них также во много раз меньше, чем через зенитные фонари и светопрозрачные покрытия [5]. В то же время ПТС сохраняют такие преимущества естественного освещения, как естественный спектр света и его зависимость от времени дня и погоды.

Оценивать естественное освещение с помощью ПТС можно так же, как и от обычных светопроёмов, с помощью КЕО. При этом при оценке времени использования естественного освеще-

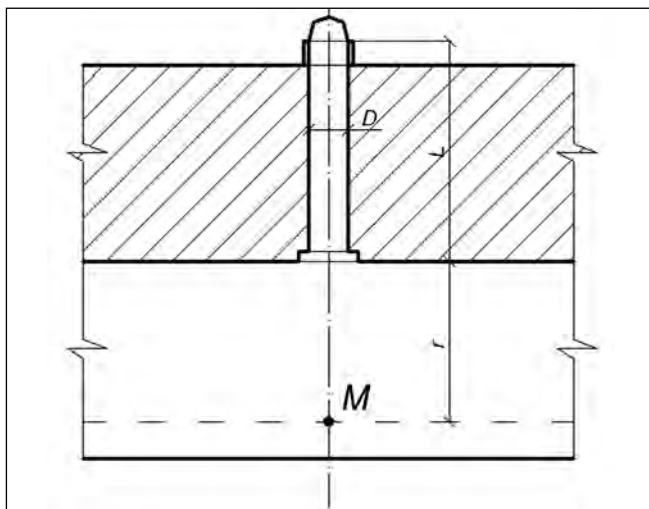


Рис. 4. Спектр солнечного света на стене помещения эскалатора метро. Копенгаген. (Фото П. Бартенбаха).

ния можно использовать не диффузную освещённость от неба, а суммарную от неба и солнца.

Общий КПД ПТС η определяется как [1]

Рис. 5. Схема к расчёту КЕО под ПТС в точке M



ние купола при эксплуатации)³; ξ – эффективность трубы прямолинейного ПТС.

При этом ξ зависит от коэффициента отражения зеркального покрытия трубы ПТС ρ , отношения длины ПТС L к его диаметру D , т.е., по сути, от количества отражений световых лучей внутри трубы и от угла наклона падающих на купол ПТС лучей к его оси θ^4 . ξ может определяться по упрощённой формуле многократных отражений [1]

$$\xi = e^{L/D} \cdot \text{tg}\theta \cdot \ln\rho / [1 - (L/D) \cdot \text{tg}\theta \cdot \ln\rho]^{1/2}. \quad (1)$$

ξ может также определяться по приведённой в [1, 2] таблице, составленной по формуле (1).

Световой поток, выходящий из рассеивателя, выражается как

$$\Phi_d = \eta \cdot \Phi_n,$$

где Φ_n – световой поток, входящий в ПТС снаружи:

$$\Phi_n = [(180 - \theta) / 180] \cdot E_n \cdot A,$$

где $(180 - \theta) / 180$ – входной коэффициент ПТС; A – площадь сечения трубы ПТС, $A = \pi \cdot D^2 / 4$; E_n – горизонтальная освещённость под открытым небом. (Если требуется определить значение условного КЕО под ПТС, то берётся $E_n = 100$ %.)

Условный КЕО под ПТС в точке M (рис. 5) ε_m , определяется как [2]

$$\varepsilon_m = L_d \cdot A / r^2, \quad (2)$$

где L_d – яркость рассеивателя, $L_d = \Phi_d / (\pi \cdot A)$; r – расстояние между центром рассеивателя и расчётной точкой M , в нашем случае это высота рассеивателя над рабочей плоскостью согласно рис. 5, $r = 4$ м).

Рис. 6. Зависимость КЕО под ПТС в точке M от диаметра трубы ПТС D

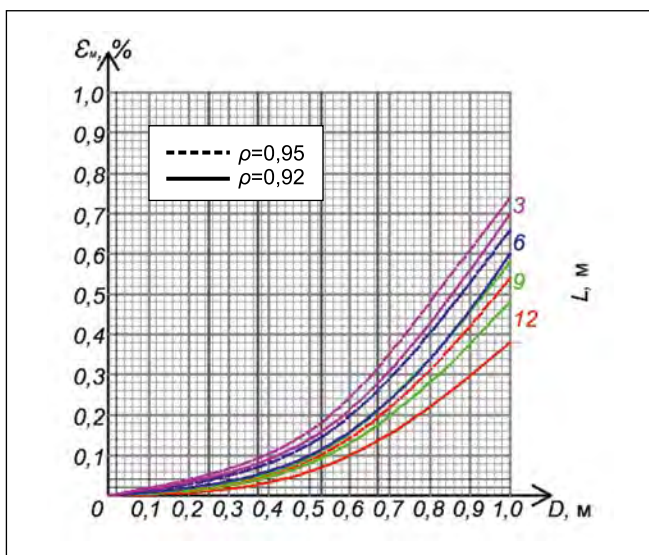
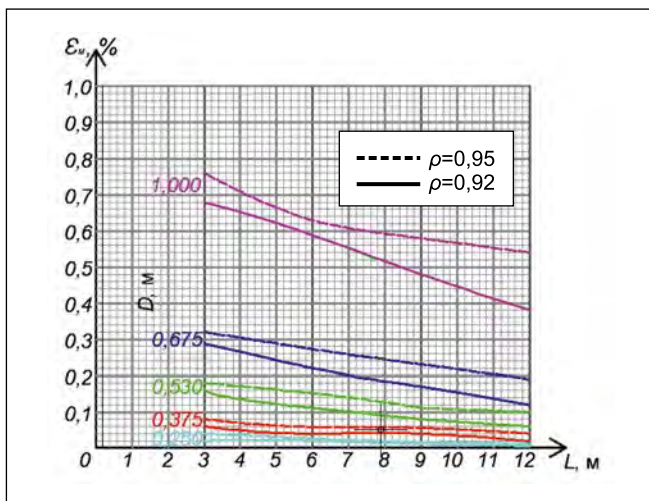


Рис. 7. Зависимость КЕО под ПТС в точке M от глубины подземного пространства



$$\eta = \tau_c \cdot \tau_d \cdot K_m \cdot \xi,$$

где τ_d – коэффициент светопропускания рассеивателя (диффузора) ПТС¹;

τ_c – коэффициент светопропускания наружного купола ПТС, его оправы и промежуточной линзы²; K_m – коэффициент запаса (учитывает загрязне-

¹ Например, у итальянского ПТС «SOLARSPOT» $\tau_d = 0,8$.

² У «SOLARSPOT» $\tau_c = 0,92$.

³ $K_m = 0,92$ [1].

⁴ θ наиболее просто определяется для прямой солнечной составляющей освещённости под открытым небом. При вертикальном положении оси ПТС θ равен зенитному расстоянию солнца в данный момент времени. Т.е. ξ зависит от высоты солнца. Средняя ξ хорошо соответствует условиям пасмурного неба МКО, при которых $\theta = 30^\circ$. (Это значение предлагается использовать для расчёта.)

Результаты расчёта КЕО под полыми трубчатыми световодами «SOLARSPOT» ПТС разного диаметра. Помещения на разной глубине. Высота от рассеивателя до расчётной плоскости – 4 м. Коэффициент светопропускания купола и рассеивателя – по Дж. Бракале [1]

$\rho = 0,92$																				
D	L = 3					L = 6					L = 9					L = 12				
	$\frac{L}{D}$	ξ	η	ε_m	$\frac{L}{D}$	ξ	η	ε_m	$\frac{L}{D}$	ξ	η	ε_m	$\frac{L}{D}$	ξ	η	ε_m	$\frac{L}{D}$	ξ	η_d	ε_m
0,25	0,0625	12	0,45	0,31	0,025	24	0,24	0,16	0,013	36	0,15	0,1	0,008	48	0,06	0,04	0,003			
0,375	0,1406	8	0,58	0,39	0,072	16	0,35	0,24	0,043	24	0,17	0,11	0,02	32	0,18	0,12	0,02			
0,53	0,2809	5,66	0,68	0,46	0,168	11,32	0,46	0,31	0,113	16,98	0,33	0,22	0,08	22,64	0,25	0,17	0,06			
0,675	0,4556	4,44	0,73	0,49	0,292	8,88	0,55	0,37	0,22	13,33	0,44	0,3	0,17	17,76	0,31	0,21	0,12			
1,0	1,0	3	0,78	0,53	0,684	6	0,67	0,45	0,59	9	0,55	0,37	0,48	12	0,44	0,29	0,38			

$\rho = 0,95$																				
D	L = 3					L = 6					L = 9					L = 12				
	$\frac{L}{D}$	ξ	η	ε_m	$\frac{L}{D}$	ξ	η	ε_m	$\frac{L}{D}$	ξ	η	ε_m	$\frac{L}{D}$	ξ	η	ε_m	$\frac{L}{D}$	ξ	η_d	ε_m
0,25	0,0625	12	0,61	0,41	0,033	24	0,39	0,26	0,021	36	0,27	0,18	0,015	48	0,16	0,11	0,009			
0,375	0,1406	8	0,69	0,47	0,085	16	0,50	0,34	0,062	24	0,39	0,26	0,048	32	0,31	0,21	0,038			
0,53	0,2809	5,66	0,76	0,51	0,19	11,32	0,63	0,42	0,155	16,98	0,48	0,32	0,12	22,64	0,40	0,27	0,10			
0,675	0,4556	4,44	0,81	0,55	0,32	8,88	0,67	0,46	0,27	13,33	0,58	0,39	0,23	17,76	0,47	0,32	0,19			
1,0	1,0	3	0,86	0,58	0,76	6	0,72	0,49	0,63	9	0,67	0,45	0,59	12	0,60	0,41	0,53			

Подставив в формулу (2) выражения для L_d и A , получим формулу для расчёта условного КЕО прямо под световодом:

$$\varepsilon_m = [\eta \cdot D^2 \cdot 0,83 / (4 \cdot r^2)] \cdot 100 (\%),$$

где $0,83 = (180 - 30) / 180$; 30 – средняя высота солнца в градусах, соответствующая условиям пасмурного неба МКО.

Результаты расчёта КЕО под прямым ПТС для подземных пространств на разной глубине при разных диаметрах ПТС и коэффициентах отражения зеркальной внутренней поверхности трубы ПТС представлены в таблице и на рис. 6 и 7.

КЕО растёт с ростом D практически параболически (рис. 6), а с ростом L плавно снижается (рис. 7). Это объяснимо тем, что от D зависит Φ_n , а от L – только количество отражений в трубе. При этом, чем D больше, тем отражений (при данной L) меньше.

Рассчитав КЕО непосредственно под ПТС, можно рассчитать КЕО и в любой точке помещения либо по закону Ламберта [2, 5], либо по методу, предлагаемому в СП 23–102–2003 (как от круглого источника света) [6].

Следует отметить, что приведённые в таблице и на рис. 6 и 7 значения ε_m получены без учёта внутренних отражений в освещаемом пространстве. Последние можно оценивать по СП 23–102–2003, как для обычных систем верхнего естественного освещения. При этом среднее значение ε_m для всей освещаемой площади подземного пространства определяются как сумма значений ε_m во всех расчётных точках помещения от всех ПТС, делённая на количество этих точек.

Выводы

Подземное пространство города, там, где это возможно, должно хорошо освещаться естественным светом. Это обеспечивает связь людей с внешней средой. Однако обычные системы верхнего естественного освещения можно применять при неглубоком расположении подземных пространств. Какова максимальная глубина для эффективного применения разных систем естественного света, ещё предстоит изучить. К тому же, обычные системы естественного освещения требуют использования больших площадей на поверхности земли, что снижает воз-

возможности планировки свободных площадей и их рекреационную ценность. Использование ПТС для освещения подземных пространств свободно от этого недостатка. Кроме того, использование ПТС не имеет таких ограничений по глубине, как для систем естественного света.

Как при применении обычных систем естественного освещения, так и ПТС, наибольшая экономия электроэнергии может достигаться только в сочетании с автоматическим регулированием дополнительного искусственного освещения. При этом с точки зрения естественного освещения наиболее целесообразны ПТС большого диаметра, что, однако, вступает в противоречие с их стоимостью и ростом теплопотуплений и теплопотерь через их конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бракале Дж. Естественное освещение помещений с помощью новой пассивной световой системы «SOLARSPOT» // Светотехника. – 2005. – № 5. – С. 34–42.
2. Соловьёв А.К. Полые трубчатые световоды: их применение для естественного освещения зданий и экономия энергии // Светотехника. – 2011. – № 5. – С. 41–47.
3. Кузнецов А.Л., Оселедец Е.Л., Соловьёв А.К., Столяров М.В. Опыт применения полых трубчатых световодов для естественного освещения в России // Светотехника. – 2011. – № 6. – С. 4–11.
4. Tageslicht im Untergrund. Innovative Tageslichtlenkung in der Metro von Kopenhagen // TAGESLICHT (Sonderausgabe der Zeitschrift LICHT). – 2004. – № 1. – S. 8–9.
5. Соловьёв А.К., Туснина О.А. Сравнительный теплотехнический расчёт систем верхнего естественного освещения (зенитные фонари и полые трубчатые световоды) // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – № 2. – С. 24–35.
6. Соловьёв А.К. Физика среды. – М.: Издательство АСВ, 2016. – 341 с.



Соловьёв Алексей Кириллович,
доктор техн. наук,
проф. Окончил
в 1965 г. МИСИ им.
В.В. Куйбышева.
Профессор кафедры
«Проектирование
зданий и сооруже-
ний» (б. кафедра
«Архитектура гра-

жданских и промышленных зданий») НИУ «МГСУ». Член Европейской академии наук и искусств и редколлегии журналов «Светотехника» и «Light & Engineering». Имеет звание «Почётный строитель РФ» и «Заслуженный работник высшей школы РФ»

Работа отраслевого НТС

Очередное заседание бюро НТС «Светотехника»

15 марта 2018 года под председательством генерального директора ВНИСИ им. С.И. Вавилова А.Г. Шахпарунянц состоялось заседание бюро научно-технического Совета «Светотехника». Почти половина заседания была посвящена обсуждению подготовки магистерских диссертаций студентами кафедры светотехники НИУ «МЭИ». Члены бюро НТС активно задавали вопросы, обсуждали и высказывали важные пожелания студентам кафедры Ксении Нечаевой (тема: «Разработка световой среды станции «Красносельская», соответствующей современным санитарным нормам и требованиям, предъявляемым к объектам «культурного наследия»), Виктории Рыбиной (тема: «Разработка установки для исследования монохроматических порогов зрительной системы»), Александру Гулиеву (тема: «Разработка световой среды станции «Комсомольская – радиальная», соответствующей современным санитарным нормам и требованиям, предъявляемым к объектам «культурного наследия») и Виталию Кузьмину (тема: «Компьютерная обработка результатов измерений освещённости автомобильных дорог мобильным способом»).

Следующая часть заседания была посвящена вопросу перспектив применения мобильных способов измерения освещённости, по которому выступил руководитель департамента информационных технологий МСК «БЛ Групп» Д.Ю. Чепелевский. Он отметил, что во ВНИСИ уже существует автомобиль с датчиками освещённости, реализована программа обработки результатов измерений и создана база данных полученных результатов. Активно идёт совместная работа БЛ Групп и ВНИСИ над последним этапом – картированием. При обсуждении было отмечено, что есть проблема с трудозатратами, но работа будет востребована и уже проявилась заинтересованность пользователей в успешном завершении проекта.

Результаты исследований на экспериментальной лабораторной установке по определению показателя яркости дорожных покрытий были доложены сотрудниками ВНИСИ В.М. Пятигорским и А.А. Коробко. Было отмечено, что в настоящее время проектировщики уличного освещения пользуются для расчётов в про-

граммах устаревшими отечественными данными по асфальтовым покрытиям или зарубежными параметрами, существенно отличающимися от российских. В Учебно-исследовательском комплексе ВНИСИ была собрана экспериментальная установка со светодиодным осветителем, отражателем, обеспечивающая необходимые характеристики освещения участка покрытия диаметром 70 мм и параметры канала измерения. Предемонстрированы слайды с оптической и кинематической схемами установки. От поставщиков получено необходимое количество образцов из московского региона, но, как выяснилось, одного типа. С помощью яркомера LMT получено 120 фотографий, а по ним – интегральные характеристики показателя яркости: освещённость и зеркальность. Этот тип отечественного асфальтового покрытия по зеркальности относится к классу R2, но не имеет аналога по освещённости. Полученные нестандартные данные заложены авторами в программу расчёта установок уличного освещения «Light in Night». Докладчики отметили, что задача оказалась сложной и многофакторной, но во ВНИСИ теперь есть установка для измерения показателя яркости дорожных покрытий, а для проверки её работы проведены исследования опытных образцов, разработано необходимое программное обеспечение.

Последним вопросом повестки дня была подготовка 1-ой международной научно-практической конференции «Свет в музее», которая пройдёт в Эрмитаже Санкт-Петербурга 18–20 апреля 2018 года, организаторами которой выступают Государственный Эрмитаж, НТС «Светотехника» и ВНИСИ. Предполагаются доклады в пленарном заседании доктора С. Кэннона Брукса (Великобритания), президента международного комитета архитектуры и музейных технологий ИКОМ Ж. Хильгерсона (Нидерланды), А.В. Богданова (Эрмитаж, Россия), Н.П. Воробьёва («Нео ЭКСПО-Арт», Россия), С. Теллини и Ф. Ианноне (Италия), Л.Г. Новаковско-го («Фарос-Алеф»), А. Шульца (Германия) и А.Г. Шахпарунянц (ВНИСИ).

**Учёный секретарь НТС
«Светотехника» к.т.н. Снетков В.Ю.**